

PCT

ORGANISATION MONDIALE DE LA PROPRIÉTÉ INTELLIGENTIELLE



WO 9607942A2

DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE I

(51) Classification internationale des brevets <sup>6</sup> : G02B 6/18, 6/22		A2	(11) Numéro de publication internationale: WO 96/07942 (43) Date de publication internationale: 14 mars 1996 (14.03.96)
(21) Numéro de la demande internationale: PCT/FR95/01121 (22) Date de dépôt international: 25 août 1995 (25.08.95) (30) Données relatives à la priorité: 94/10615 5 septembre 1994 (05.09.94) FR		(81) Etats désignés: FI, JP, US, brevet européen (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE). Publié: Sans rapport de recherche internationale, sera publiée dès réception de ce rapport.	
(71) Déposant (pour tous les Etats désignés sauf US): ALCATEL FIBRES OPTIQUES [FR/FR]; 35, rue Jean-Jaurès, F-95871 Bezons Cédex (FR).			
(72) Inventeurs; et (75) Inventeurs/Déposants (US seulement): NOUCHI, Pascale [FR/FR]; 10 A, rue des Bruyères, F-91140 Villebon-sur-Yvette (FR). SANSONETTI, Pierre [FR/FR]; 5, rue Lazare-Hoche, F-91120 Palaiseau (FR). AUDOUIN, Olivier [FR/FR]; 15, rue Henri-Dunant, F-91600 Savigny-sur-Orge (FR). HAMAIDE, Jean-Pierre [BE/FR]; 46 bis, rue du Docteur-Babin, F-91180 Saint-Germain-les-Arpajon (FR).			
(74) Mandataires: FERAY, Valérie etc.; SOSPI, 14-16, rue de la Baume, F-75008 Paris (FR).			
(54) Titre: MONOMODE OPTICAL FIBER WITH OFFSET DISPERSION (54) Titre: FIBRE OPTIQUE MONOMODE A DISPERSION DECALEE			
(57) Abstract <p>Monomode optical fibers with offset dispersion having an effective mode surface greater than <math>65 \mu\text{m}^2</math> by optimization of the geometric parameters characteristic of these fibers. The refraction index as a "U" or "W" profile.</p>			
(57) Abrégé <p>La présente invention concerne des fibres optiques monomodes à dispersion décalée dont la surface effective de mode est supérieure à <math>65 \mu\text{m}^2</math> par optimisation des paramètres géométriques caractéristiques de ces fibres. L'indice de réfraction présente un profil en forme de U ou en forme de W.</p>			

**UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION**

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publient des demandes internationales en vertu du PCT.

AT	Autriche	GB	Royaume-Uni	MR	Mauritanie
AU	Australie	GE	Géorgie	MW	Malawi
BB	Barbade	GN	Guinée	NE	Niger
BE	Belgique	GR	Grèce	NL	Pays-Bas
BF	Burkina Faso	HU	Hongrie	NO	Norvège
BG	Bulgarie	IE	Irlande	NZ	Nouvelle-Zélande
BJ	Bénin	IT	Italie	PL	Pologne
BR	Brésil	JP	Japon	PT	Portugal
BY	Bélarus	KE	Kenya	RO	Roumanie
CA	Canada	KG	Kirghizistan	RU	Fédération de Russie
CF	République centrafricaine	KP	République populaire démocratique de Corée	SD	Soudan
CG	Congo	KR	République de Corée	SE	Suède
CH	Suisse	KZ	Kazakhstan	SI	Slovénie
CI	Côte d'Ivoire	LI	Liechtenstein	SK	Slovaquie
CM	Cameroon	LK	Sri Lanka	SN	Sénégal
CN	Chine	LU	Luxembourg	TD	Tchad
CS	Tchécoslovaquie	LV	Lettonie	TG	Togo
CZ	République tchèque	MC	Monaco	TJ	Tadjikistan
DE	Allemagne	MD	République de Moldova	TT	Trinité-et-Tobago
DK	Danemark	MG	Madagascar	UA	Ukraine
ES	Espagne	ML	Mali	US	Etats-Unis d'Amérique
FI	Finlande	MN	Mongolie	UZ	Ouzbékistan
FR	France			VN	Viet Nam
GA	Gabon				

## **FIBRE OPTIQUE MONOMODE A DISPERSION DECALEE**

La présente invention concerne une fibre optique monomode à dispersion décalée.

5 Les fibres optiques monomodes dites à dispersion décalée sont telles qu'à la longueur d'onde de transmission à laquelle elles sont utilisées, qui est en général différente de 1,3 µm (longueur d'onde à laquelle la dispersion de la silice est sensiblement nulle), la dispersion chromatique de l'onde transmise est sensiblement nulle, c'est-à-dire que la dispersion chromatique de la silice, non nulle, est compensée 10 (d'où l'emploi du terme "décalée") notamment par une augmentation de l'écart d'indice  $\Delta n$  entre le cœur et la gaine optique.

La longueur d'onde de transmission choisie à l'heure actuelle pour les fibres de ligne, c'est-à-dire les fibres destinées à assurer les transmissions à longue distance, par exemple dans le cadre des liaisons transocéaniques, est sensiblement égale à 1,55 µm.

15 En effet, c'est à cette longueur d'onde qu'il est possible d'obtenir une atténuation minimale de transmission de la lumière, de l'ordre de 0,2 dB/km.

Ainsi, dans le cadre de la présente invention, les fibres considérées sont destinées à être utilisées à une longueur d'onde de 1,55 µm, la plus efficace pour la transmission.

20 Par ailleurs, on sait bien que les fibres optiques monomodes ont une largeur de bande bien plus grande que les fibres multimodes, et c'est pourquoi les développements actuels et futurs de lignes de transmission à longue distance sont axés sur les fibres optiques monomodes.

En conséquence, la présente invention s'attache tout particulièrement aux 25 fibres optiques monomodes à dispersion décalée destinées à être utilisées à une longueur d'onde sensiblement égale à 1,55 µm.

Plus précisément, l'invention se rapporte à de telles fibres optiques pour lesquelles les pertes par courbure ne dépassent pas 0,005 dB/m lorsque le rayon de courbure est de 30 mm. En effet, il est bien connu qu'une telle limitation des pertes par courbure est nécessaire pour assurer un fonctionnement dans des conditions de transmission correctes pour la fibre optique.

A l'heure actuelle, de nombreux profils de fibres optiques monomodes à dispersion décalée sont étudiés et amplement décrits dans la littérature.

30 Les profils les plus simples connus, dits en "échelon", trapèze" ou "triangle", 35 sont tels que l'indice de réfraction au niveau du cœur varie en fonction de la distance à l'axe de la fibre, de sorte que sa représentation en fonction de cette distance conduit à

une courbe formant respectivement un rectangle, un trapèze ou un triangle, l'indice au niveau de la gaine optique entourant le cœur étant constant et inférieur à celui du cœur.

On connaît aussi un profil dit à "piédestal", dans lequel la partie centrale formant le cœur "intérieur" de la fibre optique est entourée successivement d'un cœur 5 "extérieur" d'indice de réfraction inférieur à celui du cœur intérieur, puis d'une gaine optique d'indice inférieur à celui du cœur extérieur.

On connaît également un profil du type dit à "trapèze et anneau central", représenté très schématiquement en figure 1, où l'on voit la courbe donnant l'indice de réfraction  $n$  dans la fibre en fonction de la distance  $d$  à l'axe de la fibre. Dans ce profil, le 10 cœur C comprend :

- une partie centrale 10 d'indice maximal  $n_s + \Delta n$  dont l'indice varie de manière à donner à la courbe une forme de trapèze, et dans les cas limites, de triangle ou de rectangle,
- une couche 11 d'indice  $n_s$ , par exemple constant et inférieur à  $n_s + \Delta n$ , entourant la partie centrale 10,
- 15 - une couche 12 entourant la couche 11 et d'indice  $n_s + h\Delta n$  ( $0 < h < 1$ ) par exemple constant, supérieur à  $n_s$  et inférieur à  $n_s + \Delta n$ .

La couche 12 est entourée d'une couche de gaine G d'indice égal à  $n_s$ .

En pratique, le terme "trapèze" employé pour la partie centrale 10 du cœur C recouvre les formes limites de triangle et de rectangle.

20 On connaît enfin, ainsi que décrit dans l'article intitulé "Transmission characteristics of a coaxial optical fiber line", publié dans Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, N°11, Novembre 1993, un profil du type dit à "creux central enterré", représenté très schématiquement en figure 2, où l'on voit la courbe donnant l'indice de réfraction  $n$  dans la fibre optique en fonction de la distance  $d$  à l'axe de la fibre. Dans ce profil, le cœur C comprend une partie centrale 20 d'indice minimal 25  $n_s + h\Delta n$  ( $h < 0$ ) entourée d'un couche 21 d'indice  $n_s + \Delta n$  supérieur à  $n_s + h\Delta n$ . La couche 21 est entourée d'une couche de gaine G' d'indice égal à  $n_s$ .

On rappelle que, bien évidemment, tous les profils qui viennent d'être évoqués ont une symétrie de révolution autour de l'axe de la fibre optique.

30 Tous ces profils permettent d'obtenir une dispersion chromatique sensiblement nulle à 1,55  $\mu\text{m}$  ainsi que des pertes par atténuation et courbure faibles. Toutefois, un souci constant dans le cadre du développement des liaisons longue distance utilisant des fibres optiques est d'améliorer encore la qualité de la transmission et d'en diminuer le coût.

35 Or la qualité de la transmission est liée au rapport signal à bruit le long de la liaison, le bruit provenant de l'émission spontanée amplifiée générée par les

amplificateurs appartenant aux répéteurs utilisés au sein de la ligne de transmission, et l'on a montré que ce rapport signal à bruit est lui-même inversement proportionnel à une fonction F dite de pénalité de la fibre, qui dépend de la distance entre amplificateurs Z, de la surface effective de mode  $S_{eff}$  de la fibre optique utilisée, du facteur d'inversion de population  $n_{sp}$ , de l'atténuation linéique  $\alpha$  et des coefficients de couplage  $C_1$  et  $C_2$  respectivement en entrée et en sortie de l'amplificateur. La fonction de pénalité F est ainsi donnée par la formule :

$$F = \frac{n_{sp}\alpha}{S_{eff}} \left( \frac{e^{\alpha Z}}{C_1 C_2} - 1 \right) \frac{C_2}{(\alpha Z)^2} \left( \frac{e^{\alpha Z} - 1}{e^{\alpha Z}} \right).$$

On comprend d'après cette formule que, pour améliorer la qualité de la transmission, on peut chercher :

- à réduire le facteur d'inversion de population  $n_{sp}$ , toutes choses égales par ailleurs ; ceci demande cependant des mises au point complexes au niveau de la longueur d'onde de pompage et donc au niveau des composants de la ligne autres que la fibre optique,
- à réduire l'atténuation  $\alpha$  ; toutefois, cette dernière étant déjà très faible à 1,55  $\mu\text{m}$  (voisine en pratique de 0,2 dB/km), l'influence de la réduction que l'on peut escompter n'est pas notable sur la fonction de pénalité F,
- à influer sur les coefficients de couplage  $C_1$  et  $C_2$  ; ceci fait également intervenir les composants de la ligne autres que la fibre optique et demande donc des mises au point complexes,
- à augmenter la surface effective de mode  $S_{eff}$  ; ceci permet effectivement d'augmenter la qualité de la liaison.

On a représenté en figure 3 la fonction de pénalité F en dB d'une fibre optique utilisant la transmission de type Soliton en fonction de la distance entre amplificateurs Z en km pour une fibre optique connue de surface effective de mode égale à 50  $\mu\text{m}^2$  (courbe 30), et pour une fibre optique théorique de surface effective de mode égale à 70  $\mu\text{m}^2$  (courbe 31), tous les autres paramètres dont dépend F étant donnés et égaux par ailleurs. On constate que, à fonction de pénalité donnée, c'est-à-dire rapport signal à bruit donné, plus la surface effective de mode est élevée, plus la distance entre amplificateurs est élevée, ce qui permet de diminuer le nombre de répéteurs utilisés et donc le coût du système.

De même, on constate qu'à distance entre amplificateurs donnée, plus la surface effective de mode est élevée, plus la fonction de pénalité est faible, c'est-à-dire meilleure est la qualité de transmission.

Ainsi, pour améliorer la qualité de la transmission, ou bien encore, de manière équivalente, diminuer le nombre de répéteurs utilisés à qualité de la liaison donnée, ce qui permet de réduire le coût de la liaison, il est intéressant d'accroître la surface effective de mode.

5       Avec les profils d'indice simples, tels que les profils en échelon, trapèze ou triangle, pour obtenir une dispersion chromatique sensiblement nulle à 1,55 µm, c'est-à-dire pour compenser la dispersion chromatique de la silice à 1,55 µm, il est nécessaire d'augmenter la différence d'indice entre le cœur et la gaine, ce qui entraîne nécessairement une diminution de la surface effective de mode.

10      Ainsi, pour obtenir de fortes surfaces effectives de mode tout en assurant une dispersion chromatique sensiblement nulle à 1,55 µm, il est nécessaire de choisir des profils d'indice plus complexes tels que les profils représentés aux figures 1 et 2.

Jusqu'à présent, les études menées sur le profil du type trapèze et anneau central ont conduit à des surfaces effectives de mode ne dépassant pas 50 à 60 µm<sup>2</sup>.

15      Aucune étude n'a été menée pour le moment sur le profil à creux central enterré permettant de déterminer une surface effective de mode.

Le but de la présente invention est donc d'optimiser les paramètres géométriques des profils connus permettant d'obtenir des surfaces effectives de mode supérieures à celles obtenues avec les profils classiques, afin de réaliser des fibres 20 optiques monomodes à dispersion chromatique nulle au voisinage de 1,55 µm et à surface effective de mode supérieure à 65 µm<sup>2</sup>, tout en maintenant une atténuation et des pertes par courbure équivalentes à celles obtenues avec les fibres optiques connues.

La présente invention propose à cet effet une fibre optique monomode à 25 dispersion chromatique sensiblement nulle au voisinage de 1,55 µm, comprenant un cœur optique comportant :

- une partie centrale dont l'indice de réfraction en fonction de la distance à l'axe de ladite fibre optique varie entre un indice minimal  $n_s$  et un indice maximal  $n_s + \Delta n$ ,  $\Delta n$  étant strictement positif, ledit indice étant représenté par une courbe ayant sensiblement la 30 forme d'un trapèze,
- une première couche entourant ladite partie centrale, d'indice sensiblement égal à  $n_s$ ,
- une deuxième couche entourant ladite première couche, d'indice variant entre  $n_s$  et  $n_s + h\Delta n$ , avec  $0 < h < 1$ ,

et une gaine optique entourant ladite deuxième couche et ayant un indice sensiblement 35 égal à  $n_s$ , ledit profil étant défini par les paramètres géométriques suivants :

- a : rayon total du cœur, mesuré au niveau de ladite deuxième couche,

- $x$  : rapport entre le rayon de ladite partie centrale et  $a$ , avec  $0 < x < 1$ ,
- $y$  : rapport entre le rayon de ladite première couche et  $a$ , avec  $x < y < 1$ ,
- $r$  : rapport entre la petite base et la grande base dudit trapèze, avec  $0 \leq r \leq 1$ ,

ladite fibre étant caractérisée en ce que  $a$  et  $\Delta n$  sont déterminés de sorte que la

5 dispersion chromatique de ladite fibre est sensiblement nulle à  $1,55 \mu\text{m}$  et la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  de ladite fibre est telle que :  $1,4 \mu\text{m} < \lambda_c < 1,55 \mu\text{m}$ ,  $r$  est choisi quelconque entre 0 et 1 puis  $x$ ,  $y$  et  $h$  sont choisis de manière à vérifier les relations suivantes :

1°)  $x_1(r) \leq x \leq x_2(r)$  avec :

10 lorsque  $r \leq 0,5$  : 
$$\begin{cases} x_1(r) = 0,25 - 0,2r \\ x_2(r) = 0,45 \end{cases}$$
, et lorsque  $r > 0,5$  : 
$$\begin{cases} x_1(r) = 0,15 \\ x_2(r) = 0,6 - 0,3r \end{cases}$$

2°)  $y_1(x, r) \leq y \leq y_2(x, r)$  avec :

$$y_2(x, r) = y_1(x, r) + (1 + r)x \text{ et :}$$

lorsque  $r \leq 0,5$  : 
$$\begin{cases} x \leq 0,3 : y_1(x, r) = \frac{4}{3}rx + x - 0,2r \\ x > 0,3 : y_1(x, r) = 3x + 0,2r - 0,6 \end{cases}$$

lorsque  $r > 0,5$  : 
$$\begin{cases} x \leq 0,3 : y_1(x, r) = \frac{10}{3}rx - 0,5r + 0,15 \\ x > 0,3 : y_1(x, r) = 3x + 0,5r - 0,75 \end{cases}$$

3°)  $0,3 \leq \frac{2(1 - y)h}{x(1 + r)} \leq 0,45 + 0,3r$

En pratique, la relation donnée au 3°) fixe les valeurs limites du rapport entre d'une part l'aire de la surface délimitée par la courbe donnant  $n$  en fonction de  $d$  pour 15 l'anneau central du profil, et d'autre part l'aire de la surface délimitée par la courbe donnant  $n$  en fonction de  $d$  pour le trapèze.

Avec la fibre optique à profil de type trapèze et anneau central selon l'invention, on obtient des surfaces effectives de mode supérieures à  $65 \mu\text{m}^2$ , et allant jusqu'à  $85 \mu\text{m}^2$ . Ceci permet, à qualité de la liaison donnée, d'accroître la distance entre 20 amplificateurs de 10 à 30%.

La présente invention propose également, pour résoudre le problème posé, une fibre optique monomode à dispersion chromatique sensiblement nulle au voisinage de

1,55 µm, comprenant un cœur optique comportant :

- une partie centrale d'indice variable avec la distance à l'axe de ladite fibre optique entre un indice minimal  $n_s + h\Delta n$ , avec  $-1 < h < 0$  et  $\Delta n$  strictement positif, et un indice maximal  $n_s$ ,

5 - une couche entourant ladite partie centrale, d'indice variable avec la distance à l'axe de ladite fibre entre  $n_s$  et  $n_s + \Delta n$ ,

et une gaine optique entourant ladite couche et ayant un indice sensiblement égal à  $n_s$ , ledit profil étant défini par les paramètres géométriques suivants :

-  $a$  : rayon total du cœur mesuré au niveau de ladite couche,

10 -  $y$  : rapport entre le rayon de ladite partie centrale et  $a$ , avec  $0 < y < 1$ ,

ladite fibre étant caractérisée en ce que  $a$  et  $\Delta n$  sont déterminés de sorte que la dispersion chromatique de ladite fibre est sensiblement nulle à 1,55 µm et la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  de ladite fibre soit telle que :  $1,4 \mu m < \lambda_c < 1,55 \mu m$ ,  $y$  est choisi quelconque entre 0 et 1 et  $h$  est choisi de manière à vérifier les relations suivantes :

15

1°)  $h_1(y) \leq h \leq h_2(y)$  avec :

$$\begin{cases} h_1(y) = -6,56 + 14,96y - 8,71y^2 \text{ et} \\ h_2(y) = -6,2 + 16,76y - 11,61y^2 \end{cases}$$

2°)  $-2,33y + 0,6 < h < -0,2$ .

Avec la fibre optique à profil de type creux central enterré selon l'invention, on obtient des surfaces effectives de mode supérieures à  $65 \mu m^2$ , et allant jusqu'à  $95 \mu m^2$ .

20 Ceci permet également, à qualité de la liaison donnée, d'accroître la distance entre amplificateurs de 10 à 40%.

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront dans la description suivante de modes de mise en oeuvre de la présente invention, donnés à titre illustratif et nullement limitatif.

25

Dans les figures suivantes :

- la figure 1 montre en fonction de la distance  $d$  à l'axe de la fibre optique les variations de l'indice de réfraction  $n$  des différentes couches pour une fibre monomode à profil du type à trapèze et anneau central,

- la figure 2 montre en fonction de la distance  $d$  à l'axe de la fibre optique les variations

30

de l'indice de réfraction  $n$  des différentes couches pour une fibre monomode à profil du type à creux central enterré,

- la figure 3 montre, en fonction de la distance  $Z$  entre amplificateurs, la fonction de pénalité  $F$  d'une fibre optique monomode à dispersion chromatique sensiblement nulle à 1,55 µm utilisant la transmission de type Soliton,

- la figure 4 montre, en fonction de la distance  $d$  à l'axe de la fibre optique, les variations de l'indice de réfraction  $n$  théoriques et réelles des différentes couches d'une fibre optique monomode à profil du type à trapèze et anneau central.

Les figures 1 à 3 ont été décrites lors de l'exposé de l'état de la technique.

5       Ainsi qu'énoncé plus haut, les profils connus du type à trapèze et anneau central et du type à creux central enterré permettent, par un choix de leurs paramètres géométriques effectué selon les critères de la présente invention, d'obtenir des surfaces effectives de mode bien plus élevées que celles obtenues d'une part avec les profils classiques du type à échelon, trapèze ou triangle, et d'autre part avec les profils à 10 trapèze et anneau central et creux central enterré tels que mis en oeuvre dans l'art antérieur. La présente invention permet ainsi d'optimiser le choix des paramètres géométriques de ces profils pour satisfaire les exigences requises en termes de surface effective de mode, de dispersion chromatique, d'atténuation et de pertes par courbure.

15     On expose ci-après trois exemples de mise en oeuvre possibles de la présente invention, donnant les valeurs des paramètres géométriques définis plus haut et vérifiant les relations de l'invention, ainsi que la surface effective de mode, la dispersion chromatique à 1,55  $\mu\text{m}$ , la longueur d'onde de coupure, l'atténuation et les pertes par courbure obtenues avec les profils possédant ces caractéristiques.

20     On rappelle au préalable que toutes les caractéristiques géométriques des profils selon l'invention sont fonction de deux paramètres de base : le rayon total  $a$  du coeur de la fibre et la différence d'indice  $\Delta n$  entre l'indice maximal du coeur et l'indice de la gaine optique.

25     Ces paramètres fondamentaux peuvent être déterminés de manière classique afin de répondre aux exigences essentielles pour les fibres optiques dans le cadre de la présente invention, ces exigences étant les suivantes :

30     - dispersion chromatique sensiblement nulle, c'est-à-dire en pratique inférieure à 1 ps/(nm.km) au voisinage de 1,55  $\mu\text{m}$ ,  
- longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  telle que :  $1,4 \mu\text{m} < \lambda_c < 1,55 \mu\text{m}$ , pour que la transmission soit monomode aux longueurs d'onde souhaitées et pour diminuer les pertes par courbure,  
- atténuation voisine de 0,2 dB/km.

35     On rappelle brièvement comment choisir les paramètres  $a$  et  $\Delta n$  pour satisfaire les critères précédents dans le cas d'un profil du type à trapèze et anneau central, le raisonnement s'appliquant de manière similaire au profil du type à creux central enterré.

35     De manière connue, la dispersion chromatique  $C$  peut être mise sous la forme d'une fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  comme suit :

$$C(\lambda) = M(\lambda) - \frac{\Delta n}{c\lambda} V \frac{d^2(VB)}{dV^2} + \epsilon(\lambda) \quad (1),$$

où :

-  $M(\lambda)$  est un terme connu caractérisant la dispersion chromatique de la silice pure à la longueur d'onde  $\lambda$  ( $M(\lambda)$  vaut environ 22 ps/(nm.km) à 1,55  $\mu\text{m}$ ),

5 -  $V \frac{d^2(VB)}{dV^2}$  est un terme caractérisant la dispersion du guide,  $V$  étant la fréquence normalisée et  $B$  l'indice effectif normalisé (on rappelle que l'indice effectif est l'indice effectivement "vu" par l'onde lumineuse se propageant dans le cœur), fonction de  $V$ ,

-  $c$  est la célérité de la lumière dans le vide,

-  $\epsilon(\lambda)$  est un terme négligeable.

10 Etant donné que l'on cherche à avoir une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  telle que le guidage soit monomode entre 1,4 et 1,55  $\mu\text{m}$ , on peut en déduire un intervalle délimitant les variations de la fréquence normalisée  $V$ , et donc un intervalle correspondant pour  $B$ . On peut donc déduire  $\Delta n$  de l'équation (1), puis a de l'équation (2) donnant la fréquence normalisée :

$$15 \quad V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{2n_s \Delta n} \quad (2),$$

$n_s$  étant l'indice de la gaine optique et  $\lambda$  la longueur d'onde de fonctionnement.

De manière générale, pour les fibres optiques ayant un profil du type à trapèze et anneau central, le rayon de cœur a peut être choisi, pour vérifier les conditions précédentes, entre 2 et 9  $\mu\text{m}$ , et la différence d'indice  $\Delta n$  entre  $8.10^{-3}$  et  $20.10^{-3}$ .

20 Pour les fibres optiques ayant un profil du type à creux central enterré, le rayon de cœur a peut être choisi, pour vérifier les conditions précédentes, entre 2,5 et 4  $\mu\text{m}$ , et la différence d'indice  $\Delta n$  entre  $12.10^{-3}$  et  $20.10^{-3}$ .

25 D'autre part, pour le profil du type à trapèze et anneau, le choix de la valeur de  $r$  peut être quelconque entre 0 et 1, et l'on comprend bien que le terme "trapèze" doit être pris au sens large dans le cadre de la présente invention, comme incluant les cas limites où  $r$  est égal à 0 (le trapèze est alors un triangle) ou bien égal à 1 (le trapèze est alors un rectangle).

Il en est de même pour la valeur de  $y$  du profil du type à creux central enterré, y pouvant être choisi de manière quelconque entre 0 et 1 au sens strict.

30 **Exemple 1**

Dans cet exemple, la fibre optique est du type à trapèze et anneau central. Les valeurs des différents paramètres caractéristiques de la fibre sont les suivantes :

-  $a = 6,97 \mu\text{m}$ ,

5 -  $\Delta n = 10 \cdot 10^{-3}$ ,

-  $r = 0,6$

-  $x = 0,35$ ,

-  $y = 0,69$ ,

5 -  $h = 0,325$ .

Avec une telle fibre, la dispersion chromatique est de  $0,685 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  à 1558 nm, la longueur d'onde de coupure de  $1,48 \mu\text{m}$  et l'atténuation de  $0,20 \text{ dB}/\text{km}$ . Les pertes par courbure sont inférieures à  $0,005 \text{ dB}/\text{m}$  pour un rayon de courbure de 30 mm.

La surface effective de mode est de  $71 \mu\text{m}^2$ .

10 **Exemple 2**

Dans cet exemple, la fibre optique est du type à creux central enterré. Les valeurs des différents paramètres caractéristiques de la fibre sont les suivantes :

-  $a = 3,07 \mu\text{m}$ ,

-  $\Delta n = 15,6 \cdot 10^{-3}$ ,

15 -  $y = 0,56$ ,

-  $h = - 0,55$ .

Avec une telle fibre, la dispersion chromatique est de  $0,7 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  à 1558 nm, la longueur d'onde de coupure de  $1,485 \mu\text{m}$  et l'atténuation de l'ordre de  $0,21 \text{ dB}/\text{km}$ . Les pertes par courbure sont inférieures à  $5 \cdot 10^{-7} \text{ dB}/\text{m}$ .

20 La surface effective de mode est de  $71,9 \mu\text{m}^2$ .

**Exemple 3**

Dans cet exemple, la fibre optique est du type à creux central enterré. Les valeurs des différents paramètres caractéristiques de la fibre sont les suivantes :

-  $a = 3,3 \mu\text{m}$ ,

25 -  $\Delta n = 14,7 \cdot 10^{-3}$ ,

-  $y = 0,606$ ,

-  $h = - 0,599$ .

Avec une telle fibre, la dispersion chromatique est de  $0,7 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  à 1558 nm, la longueur d'onde de coupure de  $1,485 \mu\text{m}$  et l'atténuation de l'ordre de  $0,21 \text{ dB}/\text{km}$ . Les pertes par courbure sont inférieures à  $10^{-3} \text{ dB}/\text{m}$ .

30 La surface effective de mode est de  $89,8 \mu\text{m}^2$ .

Bien évidemment, la présente invention n'est pas limitée aux modes de mise en œuvre particuliers qui viennent d'être décrits.

Notamment, lorsque l'on évoque des formes géométriques précises comme des trapèzes, des triangles, des rectangles, etc..., il est bien évident qu'en pratique, les profils obtenus peuvent différer plus ou moins sensiblement des profils théoriques, et il a

5 été montré dans la littérature que ces différences, si elles restent contrôlées, ne changent pas les propriétés attendues pour les fibres optiques concernées. A titre d'exemple, on montre en figure 4 un profil réel 40 du type à trapèze et anneau central, tel que mesuré sur une fibre optique ; on montre que ce profil réel 40 est équivalent au 5 profil théorique 41 également représenté en figure 4. Pour plus de détails sur une telle équivalence, on peut se reporter au brevet US-4 406 518 de la société Hitachi.

D'autre part, il est bien évident que l'anneau central du profil du type à trapèze et anneau central n'a pas nécessairement la forme théorique d'un rectangle, mais peut également prendre la forme théorique d'un trapèze ou d'un triangle, et plus 10 généralement en pratique toute forme équivalente à ces dernières.

Ainsi, pour les fibres selon l'invention, il est important que les paramètres géométriques (distances à l'axe de la fibre, différences d'indices) vérifient sensiblement les relations de l'invention, mais il n'est pas nécessaire que la forme réelle des courbes soit exactement conforme à la forme géométrique théorique pour le profil considéré.

15 Enfin, on pourra remplacer tout moyen par un moyen équivalent sans sortir du cadre de l'invention.

**REVENDICATIONS**

1/ Fibre optique monomode à dispersion chromatique sensiblement nulle au voisinage de 1,55 µm, comprenant un cœur optique comportant :

- 5 - une partie centrale d'indice variable avec la distance à l'axe de ladite fibre optique entre un indice minimal  $n_s + h\Delta n$ , avec  $-1 < h < 0$  et  $\Delta n$  strictement positif, et un indice maximal  $n_s$ ,
- une couche entourant ladite partie centrale, d'indice variable avec la distance à l'axe de ladite fibre entre  $n_s$  et  $n_s + \Delta n$ ,
- 10 et une gaine optique entourant ladite couche et ayant un indice sensiblement égal à  $n_s$ , ledit profil étant défini par les paramètres géométriques suivants :
  - $a$  : rayon total du cœur mesuré au niveau de ladite couche,
  - $y$  : rapport entre le rayon de ladite partie centrale et  $a$ , avec  $0 < y < 1$ ,
laite fibre étant caractérisée en ce que  $a$  et  $\Delta n$  sont déterminés de sorte que la
- 15 dispersion chromatique de ladite fibre est sensiblement nulle à 1,55 µm et la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  de ladite fibre soit telle que :  $1,4 \mu m < \lambda_c < 1,55 \mu m$ ,  $y$  est choisi quelconque entre 0 et 1 et  $h$  est choisi de manière à vérifier les relations suivantes :

1°)  $h_1(y) \leq h \leq h_2(y)$  avec :

$$\begin{cases} h_1(y) = -6,56 + 14,96y - 8,71y^2 \text{ et,} \\ h_2(y) = -6,2 + 16,76y - 11,61y^2 \end{cases}$$

20 2°)  $-2,33y + 0,6 < h < -0,2$ .

2/ Fibre optique selon la revendication 1 caractérisée en ce que  $a$  est compris entre 2,5 et 4 µm et  $\Delta n$  est compris entre  $12 \cdot 10^{-3}$  et  $20 \cdot 10^{-3}$ .

3/ Fibre optique monomode à dispersion chromatique sensiblement nulle au voisinage de 1,55 µm, comprenant un cœur optique comportant :

- 25 - une partie centrale dont l'indice de réfraction en fonction de la distance à l'axe de ladite fibre optique varie entre un indice minimal  $n_s$  et un indice maximal  $n_s + \Delta n$ ,  $\Delta n$  étant strictement positif, ledit indice étant représenté par une courbe ayant sensiblement la forme d'un trapèze,
- une première couche entourant ladite partie centrale, d'indice sensiblement égal à  $n_s$ ,
- 30 - une deuxième couche entourant ladite première couche, d'indice variant entre  $n_s$  et  $n_s + h\Delta n$ , avec  $0 < h < 1$ ,
- et une gaine optique entourant ladite deuxième couche et ayant un indice sensiblement égal à  $n_s$ , ledit profil étant défini par les paramètres géométriques suivants :
  - $a$  : rayon total du cœur, mesuré au niveau de ladite deuxième couche,

- x : rapport entre le rayon de ladite partie centrale et a, avec  $0 < x < 1$ ,  
 - y : rapport entre le rayon de ladite première couche et a, avec  $x < y < 1$ ,  
 - r : rapport entre la petite base et la grande base dudit trapèze, avec  $0 \leq r \leq 1$ ,  
 ladite fibre étant caractérisée en ce que a et  $\Delta n$  sont déterminés de sorte que la  
 5 dispersion chromatique de ladite fibre est sensiblement nulle à  $1,55 \mu m$  et la longueur  
 d'onde de coupure  $\lambda_c$  de ladite fibre est telle que :  $1,4 \mu m < \lambda_c < 1,55 \mu m$ , r est choisi  
 quelconque entre 0 et 1 puis x, y et h sont choisis de manière à vérifier les relations  
 suivantes :

1°)  $x_1(r) \leq x \leq x_2(r)$  avec :

10 lorsque  $r \leq 0,5$ :  $\begin{cases} x_1(r) = 0,25 - 0,2r \\ x_2(r) = 0,45 \end{cases}$  et lorsque  $r > 0,5$ :  $\begin{cases} x_1(r) = 0,15 \\ x_2(r) = 0,6 - 0,3r \end{cases}$

2°)  $y_1(x, r) \leq y \leq y_2(x, r)$  avec :

$$y_2(x, r) = y_1(x, r) + (1 + r)x \text{ et :}$$

lorsque  $r \leq 0,5$  :  $\begin{cases} x \leq 0,3: y_1(x, r) = \frac{4}{3}rx + x - 0,2r \\ x > 0,3: y_1(x, r) = 3x + 0,2r - 0,6 \end{cases}$

lorsque  $r > 0,5$  :  $\begin{cases} x \leq 0,3: y_1(x, r) = \frac{10}{3}rx - 0,5r + 0,15 \\ x > 0,3: y_1(x, r) = 3x + 0,5r - 0,75 \end{cases}$

3°)  $0,3 \leq \frac{2(1 - y)h}{x(1 + r)} \leq 0,45 + 0,3r$

4/ Fibre selon la revendication 3 caractérisée en ce que a est compris entre 2 et  $9 \mu m$  et  
 $\Delta n$  est compris entre  $8.10^{-3}$  et  $20.10^{-3}$ .

1/2

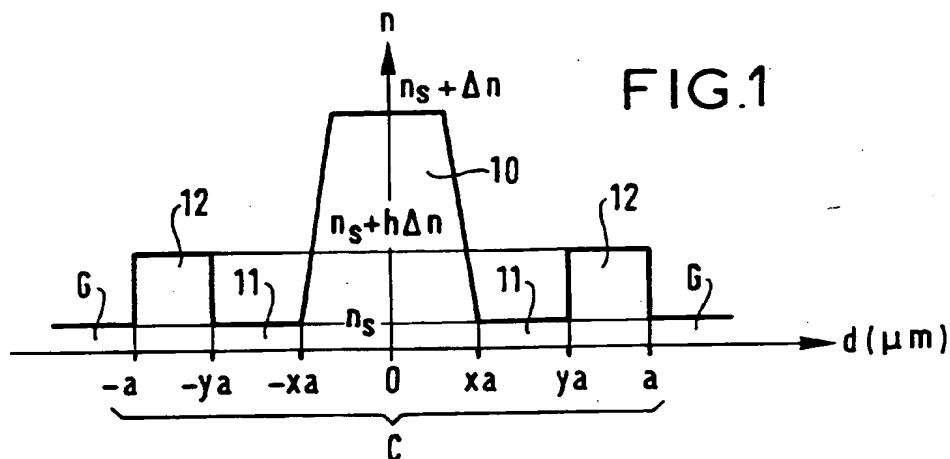


FIG.1

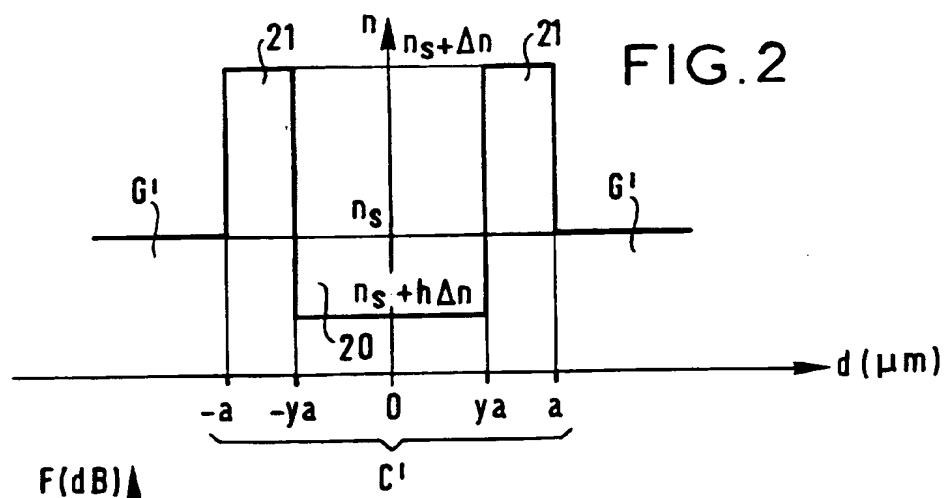


FIG.2

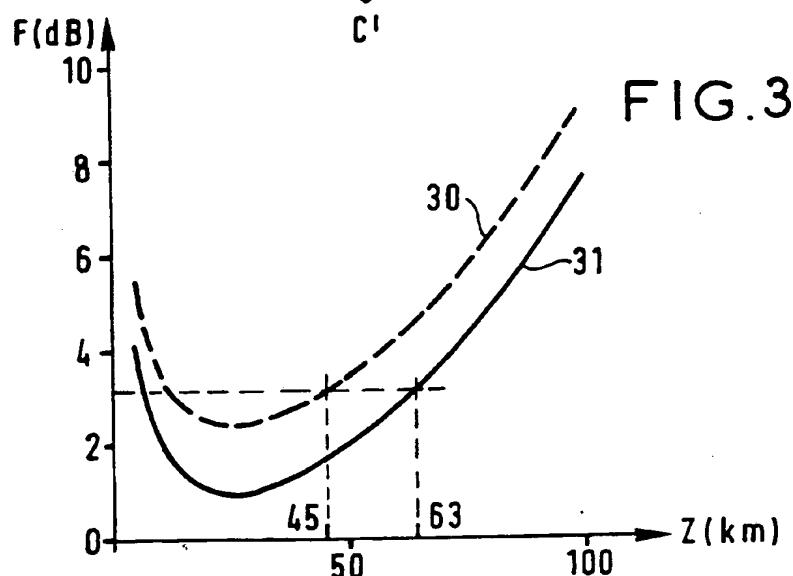


FIG.3

2/2

FIG. 4

